

TRANSFORMASI GEOMETRI DOSIS-MATRIK SUMBER RADIASI BATANG KE APLIKATOR PADA PEREKAYASAAN TPS-BRAKITERAPI

Achmad Suntoro
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir/suntoro@batan.go.id

ABSTRAK

TRANSFORMASI GEOMETRI DOSIS-MATRIK SUMBER RADIASI BATANG KE APLIKATOR PADA PEREKAYASAAN TPS-BRAKITERAPI. Routine pemrograman untuk memindahkan dosis-matrik sumber batang yang telah dibuat secara off-line ke 6-posisi di aplikator menggunakan transformasi geometri telah dibuat. Matrik transformasi geometri yang digunakan diturunkan dari matrik primitif translasi dan rotasi mengikuti posisi aplikator ketika digunakan dalam terapi yang telah diketahui posisinya melalui program rekonstruksi koordinat. Ukuran dosis-matrik aplikator disesuaikan dengan ukuran dosis-matrik sumber batang dan dinamika gerak aplikator ketika dalam posisi terapi sehingga paparan radiasi dari sumber di aplikator akan dapat digambarkan secara lengkap untuk keperluan proses TPS. Kegiatan ini merupakan kegiatan persiapan dalam pemrograman komputer untuk membuat dosis-matrik aplikator dalam posisi terapi melalui look-up table dan transformasi geometri. Dengan teknik ini dosis-matrik akan lebih cepat diperoleh sehingga kurva isodosis dari aplikator juga akan lebih cepat dibentuk.

Kata kunci : Transformasi-geometri, dosis-matrik, aplikator, sumber-batang, matrik-transformasi.

ABSTRACT

A GEOMETRIC TRANSFORMATION FOR DOSE-MATRIX RADIATION OF A ROD SOURCE TO APPLICATOR IN DESIGN & CONSTRUCTION OF TPS - BRACHYTHERAPY. A programming routine to move a dose-matrix rod source radiation that has been created off-line to the 6 - position in the applicator using geometric transformation has been made. The geometric transformation matrix used is derived from some primitive translation and rotation matrices following the position of the applicator in therapy position through a coordinate reconstruction program. Dose-matrix size of the applicator is adjusted to both the size of the rod source dose-matrix and dynamic position of applicator in a therapy position so that the radiation exposure from sources in the applicator will be described in full for the purposes of the TPS process. This activity is a preparatory activity in computer programming to create a dose-matrix applicator in therapy position through the look- up table and transformation geometry. With this technique the dose-matrix will be obtained quickly so that its isodose curve of the applicator will also be created faster.

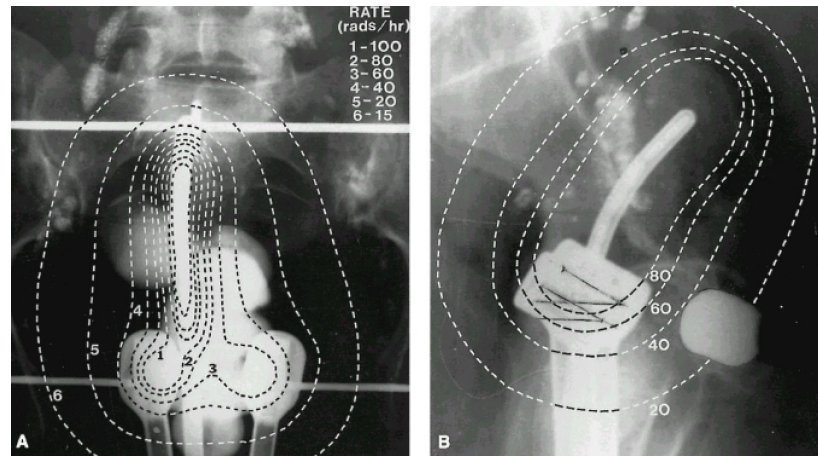
Key words: Geometric-transformation, dose-matrix, applicator, rod-source, transformation-matrix.

1. PENDAHULUAN

Treatment Planning System (TPS) dalam proses terapi kanker servik menggunakan teknik brakiterapi merupakan proses simulasi dalam rangka membuat strategi terapi dengan radiasi yang akan dilaksanakan. Salah satu tugas dalam TPS brakiterapi adalah membuat kurva isodosis dari sumber radiasi yang terletak di dalam aplikator dalam posisi terapi seperti pada Gambar 1. Dari kurva ini tim terapi membuat suatu keputusan strategi yang akan dijalankan selanjutnya.

Kurva isodosis merupakan garis yang menghubungkan titik-titik disekitar aplikator yang mempunyai paparan dosis radiasi sama. Paparan dosis radiasi dibuat berdasarkan perhitungan menggunakan rumus matematik yang pada umumnya dihitung memerlukan waktu yang terlalu lama untuk proses simulasi yang bersifat interaktif.

Oleh karena itu teknik-teknik lain untuk mendapatkan paparan dosis radiasi dengan waktu yang lebih cepat merupakan area penelitian yang berkembang.



Gambar 1. Kurva isodosis sumber di aplikator pada posisi terapi untuk proyeksi tampak atas dan tampak samping^[1].

Teknik perhitungan menggunakan *look-up-table*, dimana perhitungan yang memerlukan waktu lama tersebut dihitung secara *off-line* (ditempat dan waktu yang terpisah) dan hasil perhitungan disimpan dalam sebuah file *data-base* dalam bentuk matrik (tabel). Data yang telah siap tersebut dapat digunakan dengan penyesuaian yang diperlukan. Sebagai contoh untuk mendapatkan paparan dosis radiasi jika sumber berada di aplikator, maka data yang telah siap tersebut ditransformasikan secara geometri (dipindah) ke posisi aplikator. Proses perhitungan transformasi akan lebih cepat dibandingkan menghitung langsung paparan tersebut dengan menggunakan persamaan matematik yang biasa digunakan.

Dalam makalah ini akan ditunjukkan teknik menghitung distribusi paparan dosis radiasi disekitar aplikator menggunakan teknik *look-up-table* dari *data-base* yang telah tersedia dengan menggunakan transformasi geometri. *Data-base* berisi distribusi paparan dosis radiasi sebuah sumber radiasi batang yang akan digunakan dalam terapi (sudah tersedia – dibuat secara *off-line*) dan transformasi geometri digunakan untuk memindahkan distribusi paparan dosis sumber radiasi batang tersebut ke posisi-posisi sumber radiasi di aplikator ketika digunakan untuk terapi. Masing-masing distribusi dosis hasil transformasi geometri tersebut dijumlahkan dan akan menghasilkan distribusi total dari aplikator, yang selanjutnya dari distribusi total tersebut dihasilkan kurva isodosis.

2. DASAR TEORI

2.1 TRANSFORMASI GEOMETRI

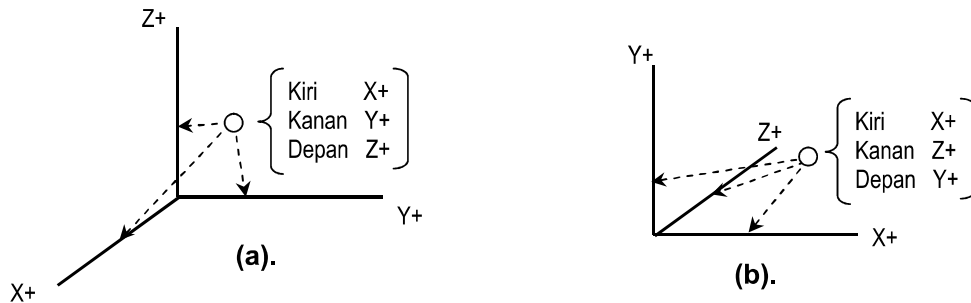
Proses perubahan koordinat suatu obyek yang melibatkan translasi (pergeseran), rotasi (putaran), skala, dan refleksi atas suatu titik dengan koordinat tertentu terhadap suatu titik referensi tertentu disebut dengan transformasi geometri. Matrik transformasi diperlukan untuk melakukan proses transformasi, dan matrik transformasi dapat berasal dari perkalian matrik-matrik primitif translasi, rotasi, skala, dan refleksi, untuk mendapatkan koordinat yang diinginkan. Gambar 2 adalah matrik-matrik primitif translasi dan rotasi yang dapat digunakan dalam kegiatan ini dengan penyesuaian^[2].

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{Translasi} & \text{Rotasi poros sumbu-X} \\ \\ \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{Rotasi poros sumbu-Y} & \text{Rotasi poros sumbu-Z} \end{matrix}$$

Gambar 2. Matrik primitif translasi dan rotasi^[2].

2.2. Perbedaan Sumbu Koordinat

Orientasi sumbu koordinat yang digunakan dalam program TPS brakiterapi ini berbeda dengan sumbu koordinat yang biasa digunakan (standard). Oleh karena itu matrik transformasi geometri standard pada Gambar 2 tidak bisa digunakan secara langsung. Perbedaan orientasi sumbu koordinat tersebut dapat disesuaikan dengan cara mengganti (tukar tempat) antara ordinat Z dan Y. Gambar 3 memperlihatkan perbedaan sistem sumbu koordinat tersebut sehingga pertukaran tempat tersebut dapat dilakukan.



Gambar 3. Perbedaan sistem sumbu koordinat. (a). Sistem sumbu koordinat standard. (b). Sistem sumbu koordinat Brakiterapi yang digunakan.

Pada sistem koordinat yang biasa digunakan, dengan melihat titik pusat koordinat: kiri X+, kanan Y+, dan atas Y+. Untuk sistem koordinat brakiterapi: kiri X+, kanan Z+, dan atas Y+. Jadi perbedaannya adalah ordinat Y dan Z yang berbalikan tempat. Oleh karena itu, matrik transformasi pada Gambar 2 tetap dapat digunakan, dan hasil akhirnya untuk Z dan Y ditukar tempat.

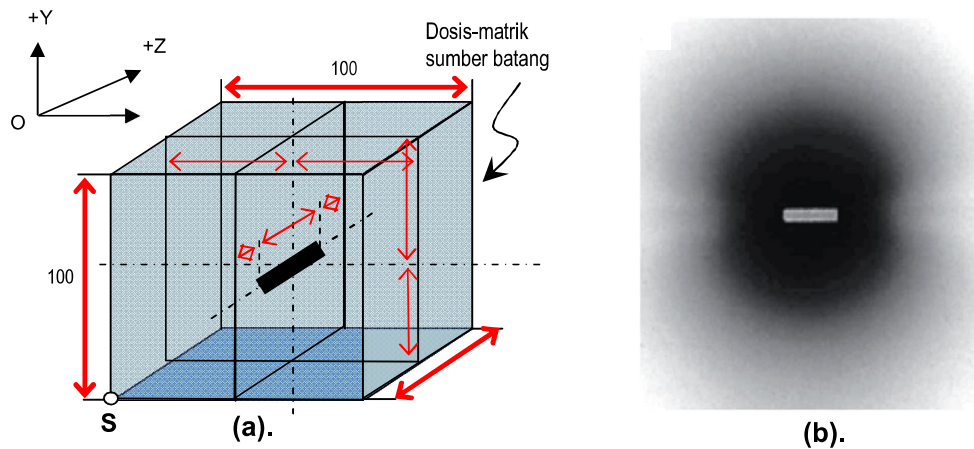
3. TATA KERJA

Dalam prakteknya, pemindahan dosis-matrik menggunakan transformasi geometri perlu terlebih dahulu diketahui ukuran dari dosis-matriknya sehingga tidak ada data penting yang hilang. Oleh karena itu resolusi dosis-matrik harus ditentukan. Koordinat sumber radiasi ketika berada di aplikator juga harus ditentukan, karena berdasarkan koordinat tersebut matrik transformasi ditentukan. Dari dua informasi tersebut dosis-matrik aplikator dapat ditentukan dengan menggunakan dosis-matrik sumber batang yang telah dihitung dosis-matriknya secara off-line yang digunakan

dengan cara *look-up-table* untuk ditransformasikan ke posisi yang sesuai di aplikator. Berikut adalah penjelasan rinci langkah-langkah tersebut.

3.1. Resolusi dan Ukuran Dosis-Matrik Sumber Batang

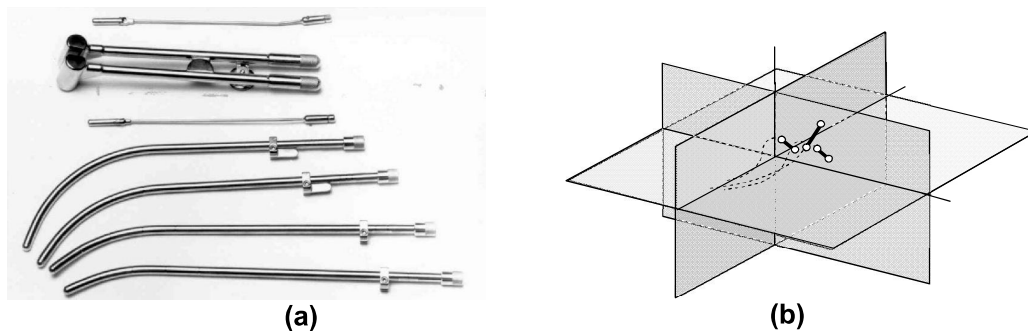
Sumber radiasi batang yang digunakan ditetapkan (dihitung) dosis-matriknya (distribusi paparan dosis radiasinya) secara *off-line*. *Data base* dosis-matrik sumber batang diposisikan pada sumbu-Z dan simetris pada pusat koordinat kartesian, seperti pada Gambar 4.a. Resolusi dosis-matrik harus dipilih disesuaikan dengan ketelitian yang diperlukan dan ukuran dosis-matrik ditentukan dari posisi terjauh dimana koordinat di posisi tersebut paparan radiasi sumber sudah dapat diabaikan nilainya. Gambar 4.b memperlihatkan radiografi sumber batang ^{137}Cs sebagai informasi kualitatif dalam penentuan ukuran dosis-matrik.



Gambar 4. Ukuran dosis-matrik (ruang data) sumber batang dalam (mm). (a). Ukuran dosis matrik sumber radiasi. (b). Hasil radiografi sumber ^{137}Cs ^[3].

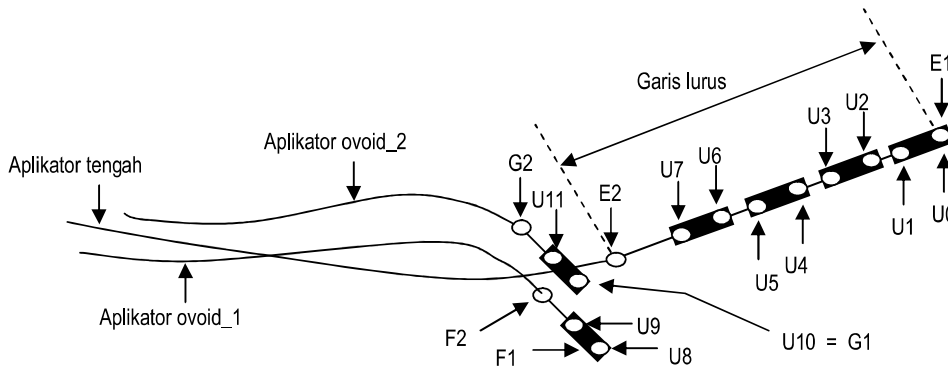
Resolusi menentukan jumlah data yang harus disimpan dan dipakai untuk operasional, sehingga menjadi pertimbangan dalam desain. Untuk resolusi 5 mm, ukuran data adalah $S[20][20][10]$ atau 4000 data. Indeks matrik 3 dimensi (0,0,0) terletak di titik S pada Gambar 4.a, sehingga data pada koordinat (0,0,0) terletak di matrik penyimpanan data $S[10][10][5]$.

3.2. Koordinat Sumber di Aplikator



Gambar 5. Aplikator brakiterapi kanker Servik. (a). Bentuk aplikator tengah. (b). Enam titik untuk mewakili aplikator yang lurus tengahnya.

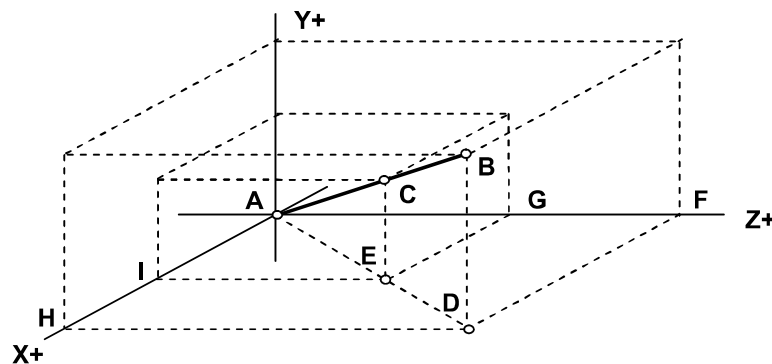
Penempatan aplikator pada proses terapi harus dilakukan oleh ahlinya sehingga dapat mengenai sasaran dengan benar^[4]. Dari sudut pandang teori analitik geometri, koordinat tiap titik di aplikator tersebut tergantung tempat kedudukan aplikator. Bentuk aplikator yang sering digunakan dalam terapi berbeda-beda disesuaikan dengan kondisi pasien seperti diperlihatkan pada Gambar 5.a. Untuk aplikator tengah dengan ujung berbentuk melengkung diperlukan 7 titik koordinat untuk mewakili aplikator tersebut^[5] sedangkan yang berbentuk garis lurus diperlukan 6 titik koordinat seperti ditunjukkan pada Gambar 5.b. Dengan menggunakan dua proyeksi tampak atas dan tampak samping dari posisi aplikator, maka koordinat titik-titik yang mewakili tempat kedudukan aplikator dapat ditentukan^[6] relatif terhadap titik nol sumbu koordinat yang digunakan.



Gambar 6. Posisi sumber radiasi batang di aplikator.

Oleh karena itu, setiap penggal aplikator (aplikator tengah berbentuk lurus) diwakili oleh dua titik yang diketahui koordinatnya. Koordinat dua titik ujung tiap sumber radiasi harus ditentukan menggunakan koordinat yang mewakili aplikator tersebut, yaitu U0-U1 s/d U10-U11 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Untuk aplikator tengah, jika perhitungan dilakukan langsung menggunakan koordinat E1 dan E2, maka memerlukan persamaan matematik yang tidak sederhana, yaitu menggunakan persamaan bola menembus garis lurus. Cara yang lebih sederhana adalah dengan memanfaatkan transformasi geometri, yaitu translasi garis E1-E2 ke pusat koordinat sehingga menjadi garis BA pada Gambar 7. Proses translasi dilakukan dengan mengurangi koordinat E1 oleh E2, dan E2 menjadi titik 0 koordinat. Panjang garis BC sama dengan panjang sumber radiasi batang (R) dan perhitungan mencari koordinat titik C pada Gambar 7 mudah dilakukan sebagai berikut.



Gambar 7. Menentukan koordinat titik C.

Koordinat titik E(Z_E , X_E) dapat dihitung dengan menggunakan perbandingan garis pada segitiga yaitu ΔADB dengan $BC = R =$ panjang sumber batang. Dengan cara yang sama koordinat C(X_C , Z_C) dapat ditentukan menggunakan ΔAFD & ΔADH . Nilai koordinat Z_C dan X_C dari C tersebut diproses menggunakan persamaan garis AB, maka akan diperoleh koordinat titik C(X_C , Y_C , Z_C) sebagai berikut:

$$X_C = X_B \left(1 - \frac{R}{\sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2}}\right) \quad (1)$$

$$Z_C = Z_B \left(1 - \frac{R}{\sqrt{X_B^2 + Y_B^2 + Z_B^2}}\right) \quad (2)$$

$$Y_C = Y_B \left(1 + \frac{Z_C - Z_B}{Z_B}\right) \quad (3)$$

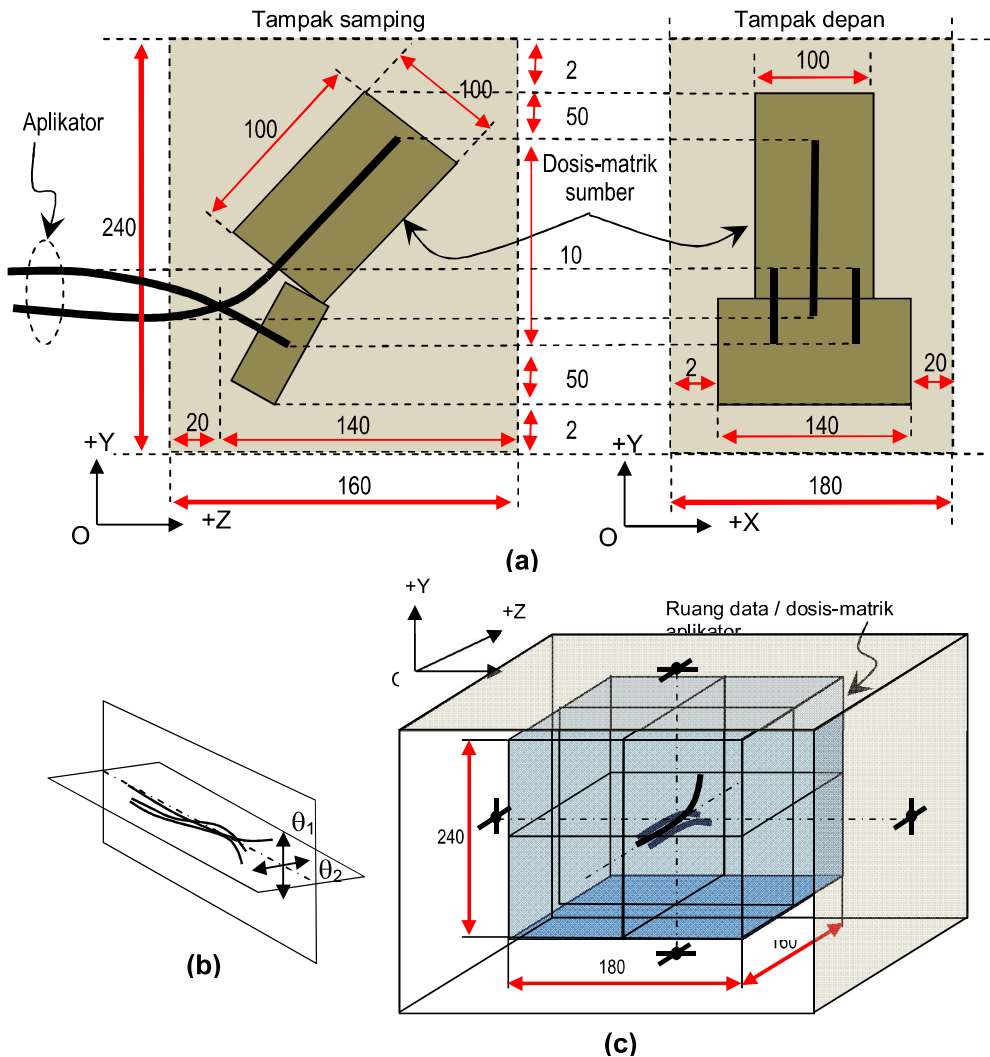
Untuk panjang BC diubah-ubah disesuaikan dengan panjang sumber batang dan jarak antar sumber batang, maka semua titik koordinat ujung 4 sumber di aplikator tengah dapat ditentukan menggunakan persamaan (1), (2), dan (3). Semua koordinat sumber batang yang telah dihitung selanjutnya ditranslasikan kembali ke posisi semula aplikator, yaitu dengan menambah semua koordinat dengan koordinat E2. Hasil translasi tersebut adalah koordinat tiap-tiap sumber batang pada posisi aplikator ketika sedang digunakan untuk proses terapi. Dengan cara yang sama koordinat dua ujung sumber radiasi di dua aplikator ovoid dapat ditentukan, yaitu menggunakan koordinat F1-F2 dan G1-G2. Gambar 8 adalah *routine* dalam bahasa C untuk menentukan koordinat tiap ujung sumber batang pada posisi terapi tersebut.

<pre> UX[0] = X_{E1}; UY[0] = Y_{E1}; UZ[0] = Z_{E1}; UX[8] = X_{F1}; UY[8] = Y_{F1}; UZ[8] = Z_{F1}; UX[10] = X_{G1}; UY[10] = Y_{G1}; UZ[10] = Z_{G1}; X_{E1} = X_{E1} - X_{E2}; Y_{E1} = Y_{E1} - Y_{E2}; Z_{E1} = Z_{E1} - Z_{E2}; X_{F2} = X_{F2} - X_{F1}; Y_{F2} = Y_{F2} - Y_{F1}; Z_{F2} = Z_{F2} - Z_{F1}; X_{G2} = X_{G2} - X_{G1}; Y_{G2} = Y_{G2} - Y_{G1}; Z_{G2} = Z_{G2} - Z_{G1}; RS = R; for(i = 1; i < 12; i++) { if((i == 1) && (i < 8)) { RS = int((1+i)/2)*RS + int(i/2)*D; UX[i] = X_{E1}*(1 - RS/sqrt(X_{E1}² + Y_{E1}² + Z_{E1}²)) + X_{E2}; UZ[i] = Z_{E1}*(1 - RS/sqrt(X_{E1}² + Y_{E1}² + Z_{E1}²)); UY[i] = Y_{E1}*(1 + (UZ[i] - Z_{E1})/Z_{E1}) + Y_{E2}; UZ[i] = UZ[i] + Z_{E2}; } else switch(i) { case 9: UX[i] = X_{F2}*(1 - RS/sqrt(X_{F2}² + Y_{F2}² + Z_{F2}²)) + X_{F1}; UZ[i] = Z_{F2}*(1 - RS/sqrt(X_{F2}² + Y_{F2}² + Z_{F2}²)); UY[i] = Y_{F2}*(1 + (UZ[i] - Z_{F2})/Z_{F2}) + Y_{F1}; UZ[i] = UZ[i] + Z_{F1}; break; case 11: UX[i] = X_{G2}*(1 - RS/sqrt(X_{G2}² + Y_{G2}² + Z_{G2}²)) + X_{G1}; UZ[i] = Z_{G2}*(1 - RS/sqrt(X_{G2}² + Y_{G2}² + Z_{G2}²)); UY[i] = Y_{G2}*(1 + (UZ[i] - Z_{G2})/Z_{G2}) + Y_{G1}; UZ[i] = UZ[i] + Z_{G1}; } } </pre>	<pre> UX[0-11] } koordinat ujung-ujung UY[0-11] } sumber radiasi batang di UZ[0-11] } aplikator pada posisi terapi D = Jarak antar sumber. R = Panjang sumber </pre>
---	---

Gambar 8. *Routine* bahasa C penentuan koordinat tiap ujung sumber di aplikator.

3.3. Penetapan Ukuran Dosis-Matrik Aplikator

Pada proses terapi, sumber radiasi akan ditempatkan pada aplikator, sehingga ukuran dosis-matrik aplikator harus ditentukan sehingga semua dosis matrik sumber radiasi dapat tertampung didalam dosis-matrik aplikator tersebut sesuai dengan daerah cakupan terapi yang diperlukan (Gambar 9.a). Posisi aplikator ketika terapi bersifat variatif-dinamis disesuaikan kondisi pasien, namun demikian variasinya terbatas seperti ditunjukkan pada Gambar 9.b dimana sudut pergeseran θ_1 dan θ_2 tidak terlalu besar. Penentuan ukuran dosis matrik aplikator berdasarkan pada bentuk geometry aplikator dan dosis-matrik sumber batang pada posisi ketika di aplikator. Dari ukuran aplikator dan ukuran dosis matrik sumber radiasi yang telah ditetapkan, ukuran dosis matrik aplikator ditentukan 180 x 240 x 160 mm seperti yang ditunjukkan pad Gambar 9.c. Untuk resolusi 5mm, maka dosis matrik aplikator berukuran: AP[36][48][32].

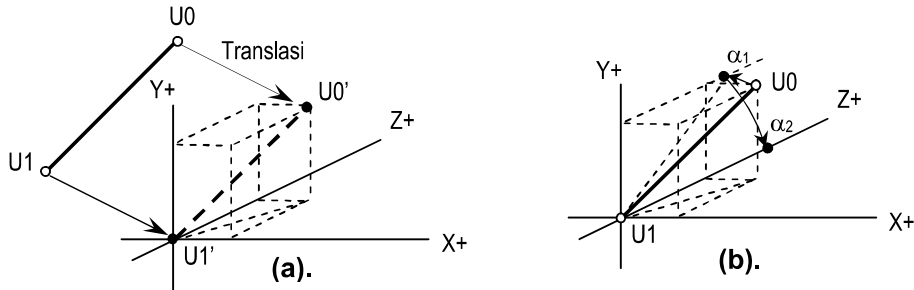


Gambar 9. Dosis-matrik aplikator (mm). (a). Penetapan ukuran dosis-matrik aplikator. (b). Ruang gerak aplikator pada posisi terapi. (c). Ukuran dosis-matrik aplikator.

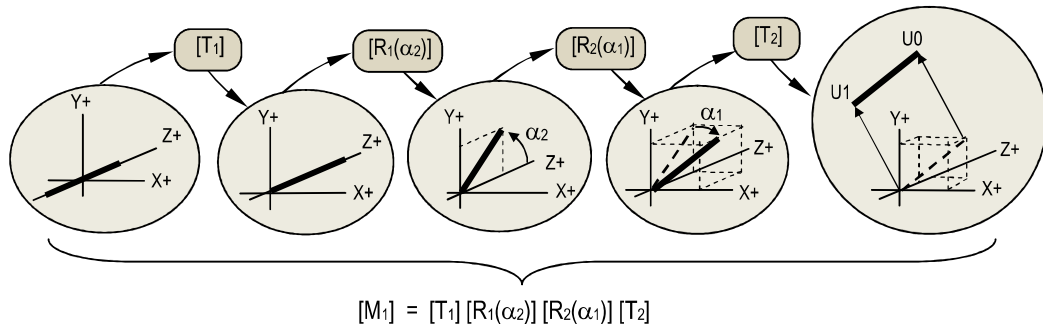
3.4. Menentukan Matrik Transformasi Sumber

Langkah awal transformasi ini dimulai dari menentukan sudut rotasi α_2 dan α_1 karena kedua sudut rotasi tersebut sama nilainya untuk transformasi sumber batang

dalam kelompok aplikator. Penentuan sudut tersebut dilakukan menggunakan dua koordinat ujung sumber batang yang ditranslasikan ke pusat koordinat seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Untuk aplikator tengah diwakili salah satu sumbernya.



Gambar 10. Penentuan nilai $\cos \alpha$ dan $\sin \alpha$ untuk rotasi sumber batang. (a). Proses translasi U_0-U_1 ke $U_0'-U_1'$. (b). Menentukan nilai α_1 dan α_2 dari koordinat titik U_0 setelah U_0 ditranslasi.



$$[M_1] = [T_1][R_1(\alpha_2)][R_2(\alpha_1)][T_2]$$

$$[M_1] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5R & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ UX[2n+1] & UZ[2n+1] & UY[2n+1] & 1 \end{pmatrix}$$

$$[M_1] = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_1 \cos \alpha_2 & \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 & -\cos \alpha_1 \cos \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0.5 R \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 + UX[2n+1] & 0.5 R \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + UZ[2n+1] & 0.5 R \sin \alpha_2 + UY[2n+1] & 1 \end{pmatrix}$$

$n = 0$ s/d 3 sumber di aplikator tengah ; $n = 4$ sumber di ovoid_1 ; $n = 5$ sumber di ovoid_2

Gambar 11. Proses menentukan matrik transformasi $[M_1]$.

Sudut α_2 & α_1 dapat dihitung nilainya berdasarkan koordinat sumber batang di aplikator yang ditranslasikan ke pusat koordinat seperti pada Gambar 10, yaitu untuk aplikator tengah koordinat U_0-U_1 , untuk aplikator ovoid_1 U_8-U_9 , dan untuk aplikator ovoid_2 $U_{10}-U_{11}$ sehingga tiap aplikator akan memiliki sudut rotasinya masing-masing. Berikut adalah perhitungan sudut rotasi α_2 & α_1 untuk sumber di aplikator tengah. Untuk

aplikator ovoid_1 indek U0 diganti dengan U8 menghasilkan sudut rotasi β_2 & β_1 , dan untuk ovoid_2 indek U0 diganti dengan U10 menghasilkan sudut rotasi γ_2 & γ_1 .

$$X_{U0} = X_{U0} - X_{U1}; Y_{U0} = Y_{U0} - Y_{U1}; Z_{U0} = Z_{U0} - Z_{U1} \quad // \text{ Translasi ke pusat koordinat}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{Z_{U0}}{\sqrt{X_{U0}^2 + Z_{U0}^2}}; \sin \alpha_1 = \frac{X_{U0}}{\sqrt{X_{U0}^2 + Z_{U0}^2}} \quad // \text{ Menghitung } \cos \alpha_1 \text{ dan } \sin \alpha_1$$

$$Z_{U0} = X_{U0} * \sin \alpha_1 + Z_{U0} * \cos \alpha_1 \quad // \text{ U0 di rotasi ke bidang } Y+Z$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{Z_{U0}}{\sqrt{Y_{U0}^2 + Z_{U0}^2}}; \sin \alpha_2 = \frac{Y_{U0}}{\sqrt{Y_{U0}^2 + Z_{U0}^2}} \quad // \text{ Menghitung } \cos \alpha_2 \text{ dan } \sin \alpha_2$$

Transformasi untuk memindahkan sumber batang ke aplikator terjadi kebalikan dari yang ditunjukkan pada Gambar 10, oleh karena itu sudut rotasi dibuat negatif. Matrik transformasi $[M_1]$ pada Gambar 11 adalah hasil dari perkalian matrik primitif yang diperlukan untuk memindahkan dosis matrik sumber radiasi batang pada posisi standardnya (Gambar 4.a dari *data-base*) ke 6 posisinya di aplikator (Gambar 6).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

```

for(n = 0 ; n < 6 ; n++)
{
  if((n == 0) && (n < 4))
  {
    for(X = 0 ; X < 20 ; X++)
    for(Y = 0 ; Y < 20 ; Y++)
    for(Z = 0 ; Z < 10 ; Z++)
    {
      SX = X cos  $\alpha_1$  - Y sin  $\alpha_1$  cos  $\alpha_2$  + Z sin  $\alpha_1$  sin  $\alpha_2$  - 0.5 R sin  $\alpha_1$  cos  $\alpha_2$  + UX[2n+1];
      SZ = X sin  $\alpha_1$  - Y cos  $\alpha_1$  cos  $\alpha_2$  - Z cos  $\alpha_1$  cos  $\alpha_2$  + 0.5 R cos  $\alpha_1$  cos  $\alpha_2$  + UZ[2n+1];
      SY = Y sin  $\alpha_2$  + cos  $\alpha_2$  + 0.5 R sin  $\alpha_2$  + UY[2n+1];
      AP[SX][SY][SZ] = AP[SX][SY][SZ] + S[X][Y][Z];
    }
  }
  else switch(n)
  {
    case 4:
    for(X = 0 ; X < 20 ; X++)
    for(Y = 0 ; Y < 20 ; Y++)
    for(Z = 0 ; Z < 10 ; Z++)
    {
      SX = X cos  $\beta_1$  - Y sin  $\beta_1$  cos  $\beta_2$  + Z sin  $\beta_1$  sin  $\beta_2$  - 0.5 R sin  $\beta_1$  cos  $\beta_2$  + UX[2n+1];
      SZ = X sin  $\beta_1$  - Y cos  $\beta_1$  cos  $\beta_2$  - Z cos  $\beta_1$  cos  $\beta_2$  + 0.5 R cos  $\beta_1$  cos  $\beta_2$  + UZ[2n+1];
      SY = Y sin  $\beta_2$  + cos  $\beta_2$  + 0.5 R sin  $\beta_2$  + UY[2n+1];
      AP[SX][SY][SZ] = AP[SX][SY][SZ] + S[X][Y][Z];
    }
    break;
    case 5:
    for(X = 0 ; X < 20 ; X++)
    for(Y = 0 ; Y < 20 ; Y++)
    for(Z = 0 ; Z < 10 ; Z++)
    {
      SX = X cos  $\gamma_1$  - Y sin  $\gamma_1$  cos  $\gamma_2$  + Z sin  $\gamma_1$  sin  $\gamma_2$  - 0.5 R sin  $\gamma_1$  cos  $\gamma_2$  + UX[2n+1];
      SZ = X sin  $\gamma_1$  - Y cos  $\gamma_1$  cos  $\gamma_2$  - Z cos  $\gamma_1$  cos  $\gamma_2$  + 0.5 R cos  $\gamma_1$  cos  $\gamma_2$  + UZ[2n+1];
      SY = Y sin  $\gamma_2$  + cos  $\gamma_2$  + 0.5 R sin  $\gamma_2$  + UY[2n+1];
      AP[SX][SY][SZ] = AP[SX][SY][SZ] + S[X][Y][Z];
    }
  }
}

```

Gambar 12. Routine transformasi sumber batang ke aplikator menggunakan $[M_1]$.

Koordinat titik (X, Y, Z) di *data-base* dosis-matrik sumber radiasi yang berada di matrik $S[X][Y][Z]$ seperti yang dijelaskan di Gambar 4.a dipindahkan ke aplikator

menggunakan matrik transformasi $[M_1]$ menjadi titik (SX, SY, SZ) yang berada di matrik AP[SX][SY][SZ]. Transformasi koordinat tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$[SX, SZ, SY, 1] = [X, Z, Y, 1] [M_1] \dots\dots\dots(4)$$

Routine dalam bahasa C untuk proses transformasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 12. Matrik S[20][20][10] berisi dosis matrik sumber radiasi batang yang telah dibuat secara *off-line* ditransformasikan ke aplikator pada posisi 6 buah batang sumber sehingga membentuk dosis-matrik aplikator yang datanya ditampung pada AP[36][48][32]. Dengan dosis-matrik aplikator ini, kurva isodosis dapat dibuat.

5. KESIMPULAN

Routine menentukan koordinat sumber radiasi batang di aplikator telah dibuat berdasarkan koordinat hasil rekonstruksi aplikator yang diwakili oleh 6 titik koordinat. Posisi sumber batang tersebut dijadikan koordinat sasaran untuk proses transformasi geometri dosis-matrik sumber batang yang telah dihitung secara *off-line* sehingga dosis-matrik aplikator dapat diketahui dengan cepat. *Routine* transformasi geometri tersebut dibuat menggunakan matrik transformasi yang diturunkan dari pemindahan koordinat posisi standard sumber batang ke koordinat 6 posisi di aplikator. Ukuran dosis-matrik aplikator dibuat disesuaikan dengan ukuran dosis-matrik sumber batang dan dinamika gerak posisi aplikator ketika dalam terapi. Kegiatan ini merupakan kegiatan persiapan untuk pemrograman komputer dalam membentuk dosis-matrik aplikator melalui *look-up table* dan transformasi geometri. Dengan teknik ini dosis-matrik akan lebih cepat diperoleh sehingga kurva isodosis juga akan lebih cepat dibentuk. Dalam kegiatan TPS, proses interaktif difasilitasi sehingga kecepatan respons suatu tindakan menjadi bagian yang penting. Penentuan dosis-matrik dengan cara *look-up table* dan transformasi geometri ini mendukung untuk proses interaktif dalam program TPS.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Datta NR dkk, 2001, *Variation of intracavitary applicator geometry during multiple HDR brachytherapy insertions in carcinoma cervix and its influence on reporting as ICRU report 38*, Radiotherapy and Oncology Vol. 60, Elsevier, London.
- [2] Newman WM dan Sproull RF, 1979, *Principles of Interactive Computer Graphics*, McGraw-Hill Book Company., London.
- [3] Jung JW and Reece WD, November 2008, *Dosimetric Characterization of ¹⁴²Pr Glass Seeds for Brachytherapy*, Applied Radiation and Isotopes Vol.66, Elsevier, London.
- [4]. Nag S, dkk, 2003, *Inter-society standards for the performance of brachytherapy: a joint report from ABS, ACMP and ACROI*, *Critical Reviews in Oncology/Hematology* 48, Elsevier, London.
- [5] Suntoro A, 2011, *Konsep Algoritma Rekonstruksi Isodosis Sumber Batang Pada Brachytheray Servik Menggunakan Transformasi Geometry.*, Jurnal Fourum Nuklir, STTN, Yogyakarta.
- [6] Suntoro A, November 2011, *Rekonstruksi Koordinat Menggunakan Kotak Rekonstruksi Dan Foto Proyeksi Sinar-X*, PRIMA, Vol. 8, No. 2, Tangerang Selatan.